

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Хабаров С.П.

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: экспертная система, нечёткая логика, подшипники качения, техническая диагностика, вибрация, температура, акустический шум.

Аннотация. Разработана нечёткая экспертная система для оценки состояния подшипников на основе текущих параметров вибрации, температуры и акустического шума. База правил сформирована на основе стандартов, рекомендаций производителей и инженерной практики. Верификация на типовых сценариях подтвердила адекватность выводов. Подход применим в системах мониторинга и интеллектуального управления энергетическими установками.

EXPERT SYSTEM FOR BEARING DIAGNOSTICS BASED ON FUZZY LOGIC

Khabarov S.P.

Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint-Petersburg

Keywords: expert system, fuzzy logic, rolling bearings, technical diagnostics, vibration, temperature, acoustic noise.

Abstract. A fuzzy expert system has been developed for assessing the condition of rolling bearings based on real-time parameters of vibration, temperature, and acoustic noise. The rule base was formulated using industry standards, manufacturer recommendations, and engineering practice. Verification on typical scenarios confirmed the adequacy of the system's conclusions. The approach is applicable in monitoring and intelligent control systems for power units.

Введение. Подшипники качения являются ключевыми элементами вращающихся узлов энергетического оборудования. Их отказ может привести к незапланированным остановам, снижению эффективности и даже авариям. В условиях перехода к концепциям предиктивного обслуживания возрастает потребность в методах диагностики, которые способны оперативно и надёжно оценивать техническое состояние на основе доступных физических параметров.

На сегодняшний день в научной литературе накоплен значительный опыт применения вибрационного, акустического и температурного мониторинга. Вибрационная диагностика, регламентированная стандартом ISO 20816-3 [1], остаётся наиболее распространённой благодаря высокой чувствительности к механическим повреждениям. Акустический контроль эффективен для обнаружения микротрещин и начальной стадии износа, особенно при малых частотах вращения [2, 3]. Температурный мониторинг позволяет предотвратить поломки, вызванные проблемами со смазочными материалами и перегрузками [4, 5]. Однако многие из существующих решений ограничиваются либо одним типом сигнала, либо требуют сложных вычислительных моделей (нейросетей), что затрудняет их внедрение в реальные системы управления энергетическими объектами с ограниченными вычислительными ресурсами [6, 7].

В настоящей работе предпринята попытка объединить три ключевых диагностических признака в единый комплексный показатель в рамках единой лёгкой и интерпретируемой модели, которая обладает минимальной сложностью и может быть напрямую интегрирована в бортовые контроллеры судовых и стационарных энергоустановок, обеспечивая прозрачную и надёжную диагностику в реальном времени.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является разработка экспертной системы на основе нечёткой логики для оценки технического состояния подшипников по трём диагностическим параметрам: уровню вибрации, температуре и акустическому шуму. Задачи исследования включают:

- выбор лингвистических переменных и их функций принадлежности на основе нормативных документов и промышленной практики;
- формализацию инженерных знаний в виде базы нечётких правил;
- верификацию модели на наборе типовых диагностических сценариев.

Для реализации системы выбран метод нечёткого вывода типа Мамдани, а средой разработки MATLAB/Octave с использованием пакета fuzzy-logic-toolkit, что обеспечивает прозрачность модели и удобство верификации.

Обоснование выбора лингвистических переменных. В качестве входных диагностических признаков выбраны три физические величины, наиболее информативные при оценке состояния подшипников: уровень вибрации, температура наружного кольца и уровень акустического шума (рис. 1).

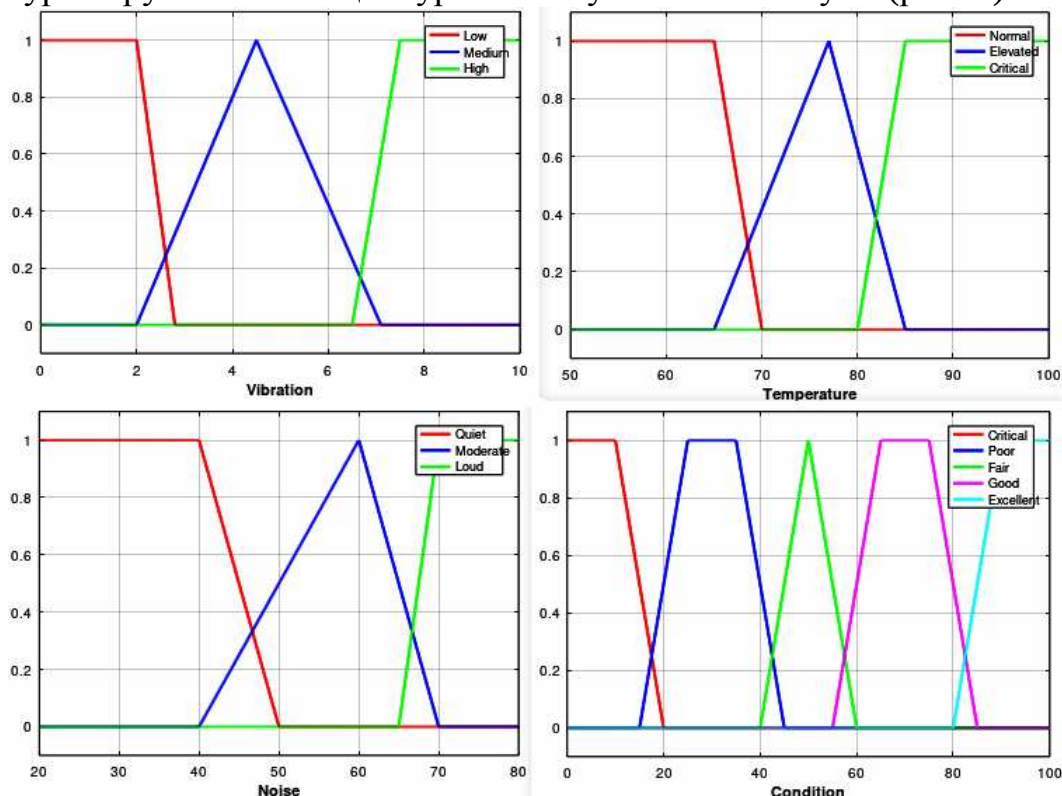


Рис. 1. Лингвистические переменные и их функции принадлежности

Пороговые значения вибрации выбраны в соответствии с международным стандартом ISO 20816-3:2022, который определяет допустимые зоны вибрации для промышленных машин мощностью свыше 15 кВт [1]. Согласно данному стандарту, значения до 2,8 мм/с относятся к зоне А (норма), 2,8-7,1 мм/с к зоне В (допустимо), а свыше 7,1 мм/с к зонам С/Д (требуется ремонт или остановка).

Критерии по температуре основаны на рекомендациях производителей подшипников (SKF, Schaeffler) и общепринятой инженерной практике. Для большинства подшипниковых узлов с консистентной смазкой температура корпуса до 70°C считается нормальной, при 70-85°C уже повышенной (требуется мониторинг), а выше 85°C критической (риск деградации смазки, перегрева или задира).

Уровни акустического шума интерпретируются в соответствии с внутренними нормативами, принятыми на отраслевых предприятиях. Уровень до 50 дБ соответствует нормальному фону, 50-70 дБ умеренному шуму, а шум выше 70 дБ соответствует тревожному состоянию, часто связанному с механическими повреждениями. Выбранные лингвистические переменные и их функции принадлежности отражают общепринятые инженерные нормы и обеспечивают физическую обоснованность выводов нечеткой системы.

Формализация инженерных знаний в виде базы нечетких правил. База нечетких правил разработана на основе анализа типовых сценариев отказов подшипников и экспертных оценок, соответствующих промышленной практике. Каждое правило имеет форму импликации

«ЕСЛИ (вибрация X) И (температура Y) И (шум Z), ТО (состояние W)», где X, Y, Z – это лингвистические значения входных переменных, а W – выходная оценка состояния. Для построения системы использовалось 18 правил, которые обеспечивают полноту покрытия диагностического пространства без избыточности (рис. 2).

```

Командное окно
>> showrule(fis)
1.  If (V is Low) and (T is Norm) and (N is Quiet), then (Res is Excel) (1)
2.  If (V is Med) and (T is Norm) and (N is Quiet), then (Res is Good) (1)
3.  If (V is Low) and (T is Elev) and (N is Quiet), then (Res is Good) (1)
4.  If (V is Low) and (T is Norm) and (N is Moderate), then (Res is Good) (1)
5.  If (V is Med) and (T is Elev) and (N is Quiet), then (Res is Fair) (1)
6.  If (V is Med) and (T is Norm) and (N is Moderate), then (Res is Fair) (1)
7.  If (V is Low) and (T is Elev) and (N is Moderate), then (Res is Fair) (1)
8.  If (V is Med) and (T is Elev) and (N is Moderate), then (Res is Fair) (1)
9.  If (V is High) and (T is Norm) and (N is Quiet), then (Res is Poor) (1)
10. If (V is High) and (T is Elev) and (N is Quiet), then (Res is Poor) (1)
11. If (V is High) and (T is Norm) and (N is Moderate), then (Res is Poor) (1)
12. If (V is High) and (T is Elev) and (N is Moderate), then (Res is Poor) (1)
13. If (V is Low) and (T is Norm) and (N is Loud), then (Res is Poor) (1)
14. If (V is Low) and (T is Elev) and (N is Loud), then (Res is Poor) (1)
15. If (V is Med) and (T is Norm) and (N is Loud), then (Res is Poor) (1)
16. If (T is Crit), then (Res is Crit) (1)
17. If (V is High) and (T is Elev) and (N is Loud), then (Res is Crit) (1)
18. If (V is High) and (T is Norm) and (N is Loud), then (Res is Crit) (1)

```

Рис. 2. База нечетких правил

В процессе построения базы знаний были учтены следующие ключевые инженерные принципы:

- критическая температура ($\geq 85^\circ\text{C}$) всегда приводит к выводу «КРИТИЧЕСКОЕ», независимо от других параметров;
- один выраженный признак ухудшения (например, высокая вибрация при нормальной температуре) классифицируется как «ПЛОХО»;

– комбинация двух и более умеренных отклонений (например, повышенная вибрация, температура и шум) указывает на начальный износ и соответствует статусу «УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО»;

– наличие двух и более «плохих» признаков (например, высокая вибрация и громкий шум) свидетельствует о развитом дефекте и требует немедленной остановки.

Все правила имеют единичный вес и используют логическое И (оператор минимума) в антецеденте, что соответствует консервативной стратегии принятия решений в задачах технической диагностики.

Тестирование разработанной системы. Для верификации корректности и адекватности предложенной нечёткой экспертной системы был разработан набор из восьми тестовых сценариев, охватывающих ключевые режимы эксплуатации подшипников: от нормального состояния до аварийных ситуаций.

Сценарии составлены на основе типовых диагностических случаев, описанных в технической литературе. Они отражают как изолированные, так и комбинированные проявления дефектов. Выбор конкретных значений для всех параметров был обоснован следующими соображениями:

– Тест 1 моделирует исправное состояние (все параметры в пределах нормы: вибрация <2,8 мм/с, температура <70°C, шум <50 дБ);

– Тесты 2 и 6 имитируют умеренный износ или внешнее возмущение (все параметры находятся в «средней» зоне: вибрация 3-4 мм/с, температура 68-72°C, шум 50-65 дБ), что характерно для оборудования, требующего усиленного мониторинга, но не ремонта;

– Тест 3 характеризует начальную стадию механического повреждения (вибрация 7,0 мм/с на границе зоны С по ISO 20816-3, при умеренной температуре и нормальном шуме);

– Тест 4 описывает термический отказ, несмотря на малую вибрацию и умеренный шум, что указывает на возможное выгорание смазки;

– Тест 5 имитирует развитый комбинированный дефект (одновременно высокая вибрация, повышенная температура и громкий шум), типичный для стадии активного разрушения подшипника;

– Тест 7 моделирует пограничное состояние (температура 70°C – верхняя граница нормы, остальные параметры в зоне А), что соответствует «хорошему», но требующему осмотра состоянию;

– Тест 8 проверяет приоритет критического параметра: несмотря на идеальную вибрацию (1,5 мм/с) и шум (25 дБ), температура 90°C однозначно указывает на аварийную ситуацию.

Такой подход обеспечивает полноту покрытия диагностического пространства, включая как типовые, так и пограничные и экстремальные сценарии, что повышает доверие к результатам модели.

Анализ результатов (рис. 3) показывает, что система корректно различает все уровни состояния (от «Отлично» до «Критическое»), адекватно реагирует единичные признаки ухудшения: высокая вибрация (Тест 3) или критическая температура (Тест 8). Не завышает оценку при умеренных отклонениях (Тесты 2, 6, 7), обеспечивает приоритет термического фактора (Тесты 4 и 8), что соответствует физике отказов подшипников. Все тесты пройдены успешно, что

подтверждает логическую непротиворечивость, полноту базы знаний и практическую применимость разработанной модели.

Командное окно							
Результаты тестирования нечёткой экспертной системы							
№	Вибрация (мм/с)	Температура (°C)	Шум (дБ)	Оценка (0–100)	Вывод системы	Рез. теста	Рекомендация.
1	1.5	60.0	35	92.5	ОТЛИЧНО	ОК!	Продолжать эксплуатацию
2	4.0	68.0	50	50.0	УДОВЛЕТВ.	ОК!	Усилить мониторинг
3	7.0	75.0	45	31.0	ПЛОХО	ОК!	Подготовить замену
4	2.5	88.0	55	7.5	КРИТИЧЕСК.	ОК!	Срочная остановка !!!
5	6.5	82.0	70	8.8	КРИТИЧЕСК.	ОК!	Срочная остановка !!!
6	3.0	72.0	65	50.0	УДОВЛЕТВ.	ОК!	Усилить мониторинг
7	2.5	70.0	45	64.1	ХОРОШО	ОК!	Плановый осмотр
8	1.5	90.0	25	7.5	КРИТИЧЕСК.	ОК!	Срочная остановка !!!

Все тесты пройдены успешно.

Рис. 3. Результат тестирования разработанной нечеткой системы

Анализ 3D-поверхности вывода системы. Для проверки логики работы нечёткой системы была построена трёхмерная поверхность, отображающая зависимость выходной оценки состояния подшипника от двух ключевых параметров: уровня вибрации и температуры, при заданном значении акустического шума, равном 55 дБ (рис. 4).

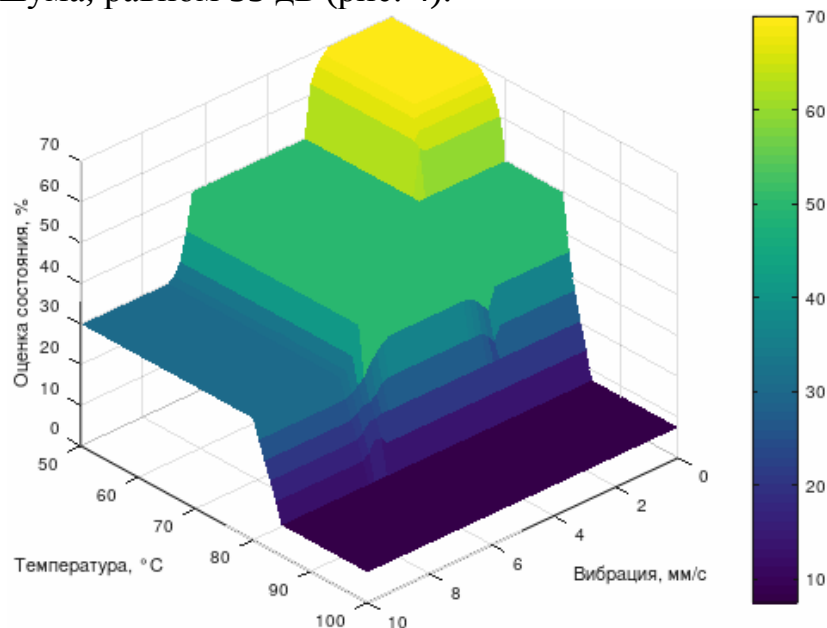


Рис. 4. Зависимость оценки состояния подшипника от уровня вибрации и температуры (при шуме = 55 дБ)

Эта визуализация позволяет наглядно проследить, как система реагирует на комбинации входных сигналов, выявить зоны резких переходов между состояниями и убедиться в отсутствии «неопределённых» или противоречивых участков в пространстве входных переменных. Это особо важно для систем, где требуется не только численная точность, но и интуитивная согласованность с инженерными представлениями о развитии дефектов.

Анализ полученной поверхности показал, что модель корректно отражает инженерную логику: при температуре выше 85°C оценка состояния резко

снижается до критического уровня (менее 20%), независимо от значения вибрации, что требует немедленной остановки оборудования. При увеличении вибрации оценка плавно снижается, что отражает прогрессирующее механическое повреждение. В области умеренных значений обоих параметров наблюдается стабильный переход через зону «Удовлетворительно», что соответствует практике мониторинга. Отсутствие аномалий и скачков подтверждает полноту и непротиворечивость базы знаний, делая систему пригодной для её внедрения в задачах предиктивного обслуживания.

Заключение. В работе была разработана и верифицирована экспертная нечёткая система диагностики технического состояния подшипников, основанная на трёх ключевых диагностических признаках – уровне вибрации, температуре и акустическом шуме. База знаний сформирована с учётом стандартов, рекомендаций производителей и общепринятой практики, что обеспечивает физическую обоснованность и диагностическую достоверность предложенной модели.

Проведённое тестирование на расширенном наборе сценариев, включая пограничные и аварийные режимы, подтвердило корректность логики вывода: система адекватно различает пять уровней состояния, выдавая рекомендации по эксплуатации. Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал применения данного подхода в интеллектуальных системах технического обслуживания промышленного оборудования, особенно в критически важных комплексах, таких как судовые энергетические установки, где надёжность вращающихся узлов влияет на безопасность и эффективность эксплуатации.

Разработанная система может быть интегрирована в состав бортовых архитектур управления судном. Например, архитектура координированного автоматического управления, описанная в патенте [8], предусматривает адаптацию управляющих воздействий на основе внешних и внутренних данных. Диагностическая оценка состояния подшипников может выступать в роли одного из входных сигналов для такой системы, позволяя, при необходимости, снижать нагрузку или изменять режим работы.

В случае выявления критических отклонений возможно инициирование пересчёта маршрута с использованием алгоритмов планирования траекторий, подобных методу Дубинса, описанному в работе [9], с учётом ограничений по динамическим нагрузкам и надёжности энергетической установки. Таким образом, предложенный подход обеспечивает не только автономную диагностику, но и создаёт основу для синергетического взаимодействия между системами мониторинга и управления, что повышает общую устойчивость и безопасность эксплуатации сложных технических объектов.

Список литературы

1. ISO 20816-3:2022. Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min. Geneva: ISO, 2022.
2. Моргалик Б.М., Прудников А.П., Ковалев Д.М. Виброакустический контроль состояния элементов подшипников качения // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 3. – С. 60-68.

3. Мазур Е.В., Шинкаренко И.А., Сутырин В.И., Великанов Н.Л. Вибрационный контроль состояния подшипников качения гребного вала судна // Известия КГТУ. – 2020. – № 59. – С. 183-196.
4. Самойленко А.Ю., Туркин В.А. Системы мониторинга температуры подшипников судовых дизелей // Эксплуатация морского транспорта. – 2019. – № 4(93). – С. 72-80.
5. Zhao Y., Wang S., Han S., Lin C., Han C. Bearing Anomaly Wear Diagnosis Based on Integrated Oil Particle Monitoring // Sensors. 2023, vol. 23, no. 7.
6. Искусственный интеллект предупреждает отказы подшипников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.podshipnik.ru/news/AI_bearings_diagnosis.html.
7. Ученые ЮУрГУ научили ИИ обнаруживать дефекты в подшипниках [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.susu.ru/ru/news/2025/03/03/uchenye-nauchili-ii-obnaruzhivat-defekty-v-podshipnikah>.
8. Патент №2741669 РФ. Система координированного управления движением судна в режимах автоматического и дистанционного управления / А.С. Коренев, А.Г. Шпекторов, С.П. Хабаров, В.С. Соловей. – Заявка №2020127639 от 18.08.2020, опубл. 28.01.2021, Бюл. №4.
9. Вагизов М.Р., Хабаров С.П. Построение программных траекторий движения на базе решения задачи “Машина Дубинса” // Информация и космос. – 2021. – № 3. – С. 116-125.

Сведения об авторе:

Хабаров Сергей Петрович – к.т.н., доцент, с.н.с.